

0718760-1

На правах рукописи

**САФИУЛЛИН РИНАТ ГАБДУЛЛОВИЧ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КАПЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ  
ДИСПЕРГИРОВАНИИ ЖИДКОСТИ  
ПОРИСТЫМИ ВРАЩАЮЩИМИСЯ РАСПЫЛИТЕЛЯМИ**

05.17.08 - Процессы и аппараты химической технологии

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Казань 2000**

Работа выполнена в Казанской государственной архитектурно-строительной академии.

Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор Посохин В.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
профессор Анаников С.В.

кандидат технических наук,  
доцент Гильфанов Р.М.

Ведущая организация - Казанский государственный  
технический университет

Защита диссертации состоится "19" мая 2000г. в 14 часов  
на заседании диссертационного совета Д. 063.37.02 при Казанском госу-  
дарственном технологическом университете по адресу: 420015, Казань, ул.  
К.Маркса, 68 ( зал заседаний Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУ.

Автореферат разослан "19" апреля 2000 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
профессор



НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ



0000947806

А.Г.Лаптев

ПРОВЕРЕН  
26.06.2000

Актуальность темы. Целый ряд химико-технологических процессов, таких как абсорбция, ректификация, гранулирование, сушка в дисперсном состоянии, проводится в аппаратах распылительного типа. Эффективность работы таких аппаратов во многом определяется качеством распыливания жидкостей, которое обычно подразумевает однородность капель и равномерное их распределение в объеме аппарата.

Получить объемный, равномерный и практически монодисперсный факел распыла позволяют пористые вращающиеся распылители - ПВР, в которых жидкость под действием центробежной силы фильтруется сквозь стенку пористого цилиндра и практически однородными каплями сбрасывается с зерен его внешней поверхности. Известные конструкции ПВР обладают высокой прочностью, стойкостью к агрессивным средам. Важное достоинство ПВР - технологичность изготовления и возможность регулирования производительности по жидкости без ухудшения качества распыла. На сегодняшний день, однако, ощущается недостаточность информации о характеристиках работы ПВР, в особенности - о монодисперсном режиме диспергирования. Остаются малоизученными механизмы формирования капель и необходимые условия для его устойчивой реализации монодисперсного распыления. Неясность представлений о каплеобразовании и недостаток информации о дисперсных характеристиках препятствует широкому использованию ПВР в промышленных аппаратах.

Работа выполнялась в рамках межвузовской научно-технической программы «Архитектура и строительство» МО и СО РФ в период 1996-1999 гг по теме 7.0206 «Исследование каплеобразования пористыми вращающимися распылителями».

Цель и основные задачи. Цель работы состоит в создании математической модели каплеобразования с тем, чтобы на ее основе разработать эффективные конструкции ПВР с регулируемым монодисперсным распылением.

В задачи исследования входит:

- изучение квазистатического режима каплеобразования на моделях каплеобразующих элементов ПВР и определение физического механизма отрыва капель;
- разработка математической модели каплеобразования ПВР с учетом динамики процесса и свойств структуры материала распылителя;
- экспериментальное определение границ значений параметров работы ПВР, при которых реализуется монодисперсный распыл;
- разработка программы по расчету размеров капель, образующихся при работе ПВР в монодисперсном режиме распыления;
- разработка методики инженерного расчета ПВР, практическая апробация результатов исследований.

**Научная новизна работы.** Разработана математическая модель каплеобразования, позволяющая определять размеры образующихся капель в зависимости от геометрических, структурных и режимных параметров ПВР.

Описаны закономерности формирования и отрыва капель при распыливании жидкости пористыми вращающимися распылителями. Установлены предельные значения параметров работы ПВР, соответствующих режиму моносистерного каплеобразования.

**Практическая ценность.** Разработана программа для расчета отрывных объемов капель в моносистерном режиме распыления ПВР. Представлена методика расчета ПВР, на базе которой возможно проектирование аппаратов для проведения технологических процессов, требующих создания высокоразвитой поверхности взаимодействия фаз при равномерно распределенном в пространстве и моносистерном по составу факеле распыла. Промышленное использование ПВР с рассчитанными по методике характеристиками позволило вдвое увеличить эффективность аппарата для очистки аспирационного воздуха на Казанском оптико-механическом заводе. Предложен экспресс метод для определения поверхностного натяжения жидкостей. Разработан способ нейтрализации образования капель-спутников и конструкции распылителей на его основе, позволяющие получать регулируемый моносистерный распыл. Предложена конструкция ПВР для распыливания жидкостей, загрязненных механическими примесями. Экспериментальный стенд задействован в учебном процессе при проведении курса «Процессы и аппараты пылегазоочистки» на кафедре ТГВ КазГАСА.

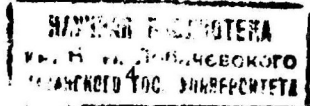
**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на: II Всероссийской научной конференции "Современные вопросы экологического образования" (г. Казань), итоговой научно-практической конференции КГУ (1997 г.), научно-технических конференциях Казанской государственной архитектурно-строительной академии (1993-1999 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе получено 3 патента на изобретения.

**Объем работы.** Диссертационная работа изложена на 179 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложения. Список использованной литературы включает 108 наименований работ отечественных и зарубежных авторов. Иллюстрационный материал содержит 43 рисунка, 4 таблицы в тексте. Приложение содержит 6 таблиц, листинг программы по расчету размеров капель.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводится анализ литературных и патентных источников, касающихся состояния и перспектив исследований ПВР, рассматриваются основные подходы и методы решения задач каплеобразования.





Отмечается, что исследователи ПВР (Шмидт, Колесник, Николаев, Мусташкин и др.) выделяют три характерных режима диспергирования: режим образования жидкого кольца на кромке ПВР (I), струйный режим (II) и режим каплеобразования на элементах поверхности распылителя (III). Переход от режима к режиму при постоянном расходе происходит постепенно с увеличением скорости вращения. Первые два режима характеризуются полидисперсным составом образующихся капель, что иллюстрируется фотографиями соответствующих режимов диспергирования и кривыми распределения капель по размерам.

Указывается, что практический интерес представляет режим III, характеризующийся стабильным и практически монодисперсным каплеобразованием, причем при смачивании материала диспергатора распыливаемой жидкостью капли формируются на микровыступах (зернах) поверхности распылителя, а при отсутствии смачивания – непосредственно на выходе из пор. Наступление режима III определяется строгим соотношением между расходом жидкости и скоростью вращения распылителя при заданных геометрических и структурных характеристиках пористого материала. При этом распределение капель по размерам в факеле распыла соответствует распределению по размерам зерен на распыливающей поверхности ПВР. Стабильное формирование капель на однородных зернах поверхности ПВР и определяет практически монодисперсный состав капель в факеле в III режиме работы распылителя.

Анализ литературных данных по проблемам каплеобразования ПВР показал, что известные расчетные зависимости не позволяют однозначно характеризовать дисперсность распыла во взаимосвязи с указанными выше параметрами. Это объясняется малоизученностью механизма формирования и отрыва капель с зерен ПВР, отсутствием физически и математически обоснованной модели процесса каплеобразования. Отмечается, что исследования в данной области очень малочисленны и носят преимущественно экспериментальный характер.

Далее показано, что первый этап моделирования каплеобразования возможен в статической постановке, основанной на решении уравнения капиллярного равновесия Юнга-Лапласа. Данный подход достаточно хорошо проработан и позволяет описать процесс формирования капель при медленном (квазистатическом) подводе жидкости вплоть до начала отрыва от каплеобразующего элемента. Отмечается, что результаты рассмотрения статической модели могут стать основой исследований фазы отрыва и динамики каплеобразования в условиях III режима диспергирования ПВР.

На основе выполненного анализа, в заключении, формулируются конкретные задачи исследований.

Во второй главе приводятся и обсуждаются результаты исследования статической модели каплеобразования, реализуемой при медленном формировании капель на смачиваемых твердых элементах - моделях зерен ПВР.

В начале главы рассматриваются схемы капель в поле силы тяжести на смачиваемых элементах цилиндрической, конической и сферической форм поверхности (рис.1). Такие формы имеют каплеобразователи известных конструкций ПВР.

Уравнение гидростатического равновесия Юнга-Лапласа

$$\frac{d\theta}{ds} + \frac{\sin \theta}{r} = \frac{2}{B} - \frac{\rho g z}{\sigma}, \quad (1)$$

описывающего осесимметричный профиль межфазовой поверхности "жидкость-газ" было решено численно с использованием следующих граничных условий

$$\left. \begin{array}{l} r = s = V = \theta = 0 \\ \text{а) } r = r_b = R \\ \text{б) } \theta = \theta_c = 90^\circ - \beta \\ \text{в) } r_b / \sin \theta_c = R \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{при } z = 0; \\ \\ \text{при } z = z_T. \end{array} \quad (2)$$

При варьировании значений радиуса кривизны в вершине капли  $B$  были определены координаты профилей  $(r, z, \theta)$  и рассчитаны максимальные объемы устойчивых капель  $V$  по формуле

$$\frac{dV}{ds} = \pi r^2 \sin \theta. \quad (3)$$

В результате получены таблицы параметров максимальных капель  $(r_b, z_T, \theta_c, B, V_k)$ , а также зависимости их объемов от геометрии смачиваемых элементов.

Анализ распределения Лапласовского давления в каплях максимального объема позволил выдвинуть гипотезу о механизме отрыва капель. Она состоит в том, что разделение жидкости при нарушении равновесия капли происходит по плоскости нулевого давления на уровне  $z=z^0$ , где силы поверхностного натяжения и тяжести равны (рис.2). Часть жидкости ниже этой плоскости будет отрываться, стягиваясь под действием нескомпенсированного положительного давления в "основную" каплю. В предположении, что объем "основной" капли практически не изменяется в процессе отрыва, были рассчитаны координаты плоскости  $z=z^0$  и определены объемы капель  $V_k^0$ , отделяющихся от цилиндра, конуса и сферы в поле силы тяжести при квазистатическом подводе жидкости к поверхности каплеобразующего элемента. Результаты расчетов с точностью аппроксимации  $\pm 8\%$  обобщаются зависимостями  $(\bar{V}_k^0 = V_k^0 / b^3, b = \sqrt{\sigma / \rho g})$ :

для цилиндра радиуса  $\bar{R} = R/b$

$$\bar{V}_k^0 = 32,05 \bar{R} / (5,9 + \bar{R}); \quad (4)$$

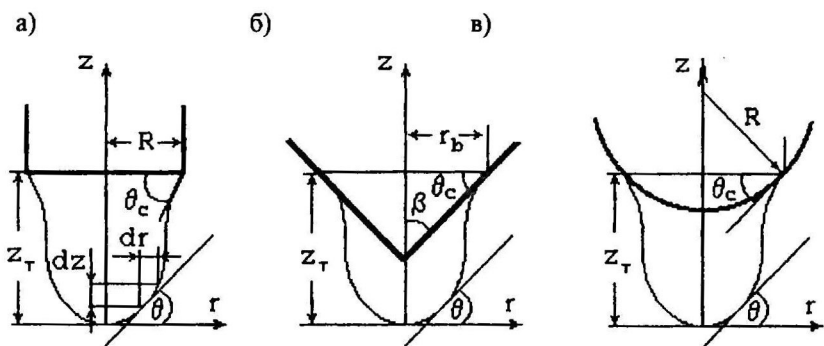


Рис.1 К расчету каплеобразования в поле силы тяжести  
(статическая модель)

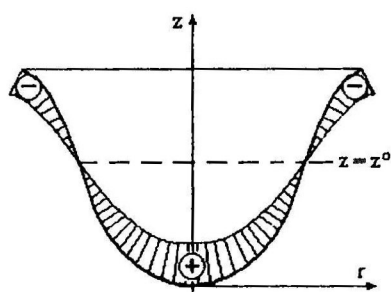


Рис.2 Эпюра давлений в капле предотрывного объема

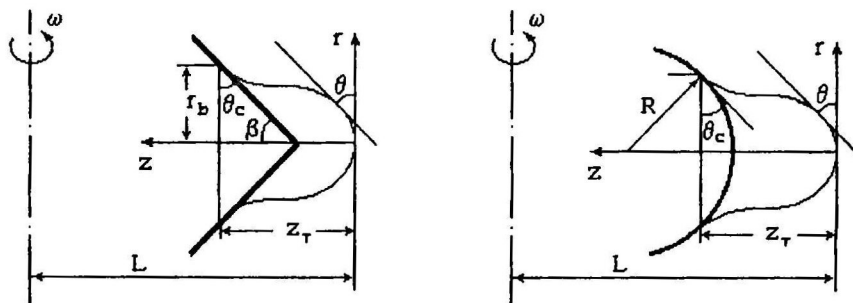


Рис.3 К расчету каплеобразования на вращающихся элементах

(статическая модель)

для конуса с углом при вершине  $\beta$

$$\bar{V}_\kappa^\circ = 38,53\beta^\circ / (278,9 + \beta); \quad (5)$$

для сферы радиуса  $\bar{R} = R/b$

$$\bar{V}_\kappa^\circ = \bar{R} / (0,18 + 0,09\bar{R}). \quad (6)$$

Далее было получено уравнение равновесия для осесимметричной капли, формирующейся на вращающемся каплеобразующем элементе (модели зерна на поверхности ПБР) (рис.3). Безразмерная форма этого уравнения после деления всех размерных величин на параметр

$$c = \sqrt[3]{2\sigma/\rho\omega^2}$$

имеет вид

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{2}{B} - \frac{\sin \theta}{r} - [\bar{L}^2 - (\bar{L} - \bar{z})^2]. \quad (7)$$

Также получено уравнение баланса сил (в проекциях на ось  $z$ ), действующих на каплю в поле центробежной силы

$$2\pi\bar{r} \sin \theta = \bar{V}\bar{L}_c + \pi\bar{r}^2 \left\{ \frac{2}{B} - [\bar{L}^2 - (\bar{L} - \bar{z})^2] \right\}, \quad (8)$$

позволяющее определять положение плоскости нулевого давления.

Уравнения (7) при граничных условиях (2) решались численно. В результате были определены параметры максимальных устойчивых капель на вращающихся каплеобразующих элементах рассмотренных форм поверхности, а также зависимости объемов капель от геометрии смачиваемых элементов. На основе выдвинутых предположений о механизме отрыва были получены значения отрывных объемов капель  $\bar{V}_\kappa^\circ$  ( $\bar{V}_\kappa^\circ = V_\kappa^\circ / c^3$ ) при различной геометрии каплеобразующих элементов и параметра  $\bar{L}$  ( $\bar{L} = L/c$ ), характеризующего центробежную силу:

для конического элемента

$$\bar{V}_\kappa^\circ = \beta / (0,0028\beta\bar{L}^{2,7} + 130,5\bar{L} - 688,8); \quad (9)$$

для сферы

$$\bar{V}_\kappa^\circ = \bar{R} / (0,13\bar{R}\bar{L}^{1,7} + 0,33\bar{L} + 0,5). \quad (10)$$

Отмечается, что результаты расчета отрывных диаметров капель близки к опытным данным известных исследований ПБР в условиях квазистатического подвода жидкости. Кроме того, рассчитанные по формуле (9) значения хорошо согласуются с характеристиками дисперсности распыла у ПБР с каплеобразователями в виде игл в капельном режиме, что подтверждает применимость рассмотренной выше модели каплеобразования для расчета распылителей.

Третья глава посвящена математическому описанию динамической модели каплеобразования, учитывающей структурные характеристики материа-

ла ПВР, а также интенсивность течения жидкости через распыливающую поверхность.

Идеализация схемы расположения гранул на поверхности ПВР подразумевала, что (рис.4):

а) все гранулы являются осесимметричными телами одинакового радиуса  $r_1$ , расположенными на цилиндрической поверхности радиуса  $z_1$  так, что отношение площадей пустот (питающих пор) и площадей сечений гранул равно коэффициенту пористости материала ПВР;

б) реальное расположение пустот на поверхности ПВР заменено кольцами вокруг гранул.

Средняя скорость течения жидкости, питающей каплю через пору, была определена на основе законов линейной фильтрации:

$$v_{cp} = \frac{1}{por} \times \frac{\chi}{\mu} \times \frac{\rho \omega^2}{2} \times \frac{z_1^2 - z_2^2}{\ln(z_1/z_2)} \times \frac{1}{z_1}. \quad (11)$$

Отмечено, что уравнение (11) выполняется при следующем соотношении параметров процесса фильтрации:

$$\beta P_1 P_2 P_3 \omega^2 \leq 1, \quad (12)$$

где величины  $P_1 = \frac{por^3}{(1-por)^2} (2r_1)^3$ ,  $P_2 = \frac{z_1^2 - r_2^2}{\ln(z_1/z_2)} \frac{1}{z_1}$ ,  $P_3 = \frac{\rho^2}{20\mu^2}$

характеризуют, соответственно, пористую структуру ПВР, геометрию распылителя и свойства жидкости. Коэффициент  $\beta$  учитывает характер взаимодействия зерен материала распылителя и жидкости (смачивание – несмачивание). Таким образом, уравнение (12) может служить основой для выбора параметров работы ПВР, при которых может быть достигнут режим каплеобразования.

Затем формулируется краевая задача для потенциала скорости течения  $\Phi$  в осесимметричном объеме капли  $\Omega$ , ограниченном поверхностью зерна  $\Sigma_1$ , поверхностью кольцевой питающей поры  $\Sigma_0$  и межфазовой поверхностью  $\Gamma$  на границе "жидкость-газ" (рис.4,6). Полагается, что в области  $\Omega$  реализуется безвихревое течение идеальной жидкости, описываемое уравнением

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0, \quad (13)$$

При формулировании краевой задачи для  $\Phi$  были введены следующие характерные величины: длина  $r_* = r_1$ ; скорость  $v_* = Q_0/r_*^2$ ; потенциал  $\Phi_* = Q_0/r_* = v_* r_*$ ; время  $t_* = r_*/v_* = r_*^3/Q_0$ ; кривизна криволинейной поверхности  $H_* = 1/r_*$ ; величина  $A_* = v_*^2$  и обозначены безразмерные переменные  $\bar{\Phi} = \Phi/\Phi_*$ ,  $\bar{t} = t/t_*$  и т.д. Для этих переменных полная система уравнений, определяющих математическую модель каплеобразования на грануле ПВР записывается в следующем виде.

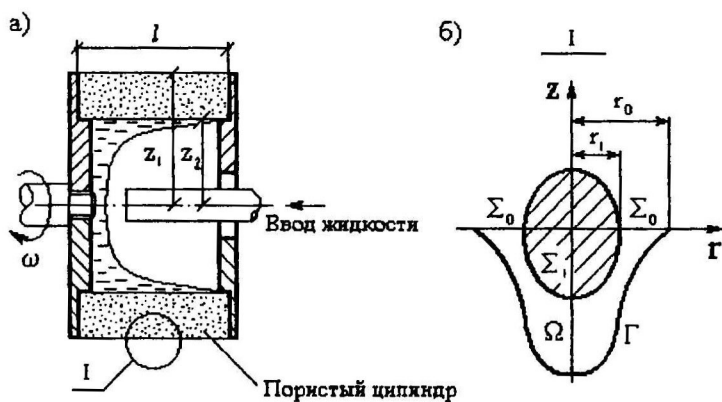


Рис.4 Схема ПВР (а) и капли на зерне (б)

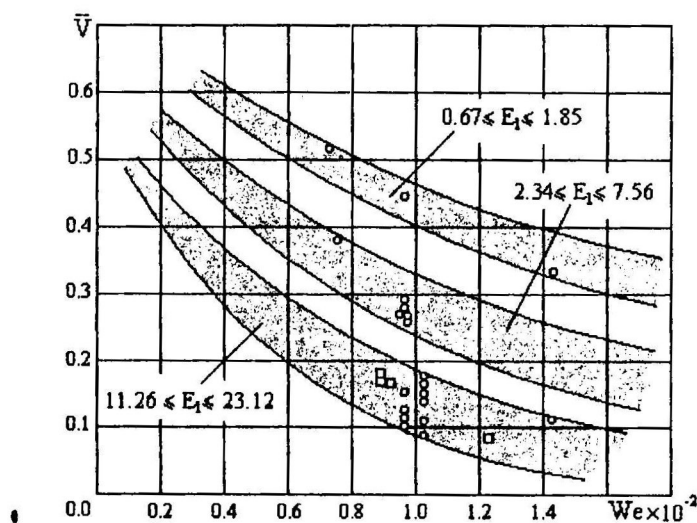


Рис.5 Зависимость отрывных объемов капель  $\bar{V}$  от критериев  $E_1$  и  $We$   
(Эксперимент:  $\bigcirc$  – Колесник,  $\square$  – Мусташкин)

Уравнение (13) в безразмерных переменных сохраняет свой вид:

$$\Delta \Phi = 0. \quad (14)$$

Граничные условия на неизменной части области  $\Omega$  (рис.4,6):

$$\text{на поверхности } \Sigma_1 \quad \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0; \quad (15)$$

$$\text{на поверхности } \Sigma_0 \quad \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{1}{\pi(\bar{r}_0^2 - \bar{r}_1^2)}, \quad (16)$$

где  $n$  – внутренняя нормаль.

На свободной поверхности капли  $\Gamma$ :

- кинематическое условие совместного движения частиц жидкой и газовой фаз на общей поверхности

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial \bar{N}}{\partial t}, \quad (17)$$

где  $N$  – смещение  $\Gamma$  по внешней нормали  $m$ ;

- динамическое условие, отражающее силовое взаимодействие фаз и устанавливающее связь между потенциалом  $\Phi$  и капиллярным давлением (уравнение Лагранжа-Коши)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \Phi)^2 - E_1 \frac{1}{2}(\bar{z}_0 - \bar{z})^2 + \frac{1}{We} \cdot 2\bar{H} + \bar{A} = 0. \quad (18)$$

где  $E_1 = \frac{r_*^4 \omega^2}{\Phi_*^2} = \frac{r_*^2 \omega^2}{v_*^2}$ ;  $We = \frac{\rho v_*^2 r_*}{\sigma}$  – критерий Вебера;  $\bar{A}$  – произвольная функция безразмерного времени.

Интегральное условие, ограничивающее скорость передвижения  $dN/dt$  поверхности  $\Gamma$ :

$$Q_0 = v_0 \int_{\Sigma_0} d\delta = \int_{\Gamma} \frac{dN}{dt} dg, \quad (19)$$

где  $d\delta$  и  $dg$  – элементы поверхностей  $\Sigma_0$  и  $\Gamma$ .

Используется также модифицированная формула В.Бляшке, связывающая вариации давления с изменением кривизны поверхности  $\Gamma$  при ее перемещении

$$-\delta \bar{p} = E_2 \left[ (\bar{k}_1^2 + \bar{k}_2^2) \bar{N} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{d}{ds} \left( \bar{r} \frac{d\bar{N}}{ds} \right) \right], \quad (20)$$

где

$$E_2 = \frac{\sigma}{r_* p_*} = \frac{1}{p_* / \rho v_*^2} \cdot \frac{\sigma}{r_* \rho v_*^2} = \frac{1}{Eu We}; \quad Eu - \text{критерий Эйлера.}$$

Далее приводится методика определения последовательных изменений межфазовой границы капли во времени, а также алгоритм численного решения краевой задачи (14)÷(20), на основе которого разработана программа

DropCalc для определения объемов отрывающихся капель в зависимости от геометрических, структурных и режимных параметров ПВР. Программа позволяет визуализировать на экране ЭВМ динамику роста и отрыва капель с поверхности зерен ПВР в капельном режиме распыления.

В заключении главы приводятся результаты расчета отрывных объемов капель  $V$  в зависимости от величины критериев  $E_j$  и  $We$ , характеризующих, соответственно, относительный вклад в динамику каплеобразования центробежной силы и силы поверхностного натяжения жидкости (рис.5).

Расчеты показывают, что отрывные объемы капель увеличиваются с ростом  $\sigma$  и уменьшаются при возрастании скорости вращения распылителя. Увеличение размеров гранул ПВР и поверхностной пористости материала приводит к увеличению размеров капель. Отклонение рассчитанных отрывных объемов от экспериментальных значений не превышает  $\pm 18\%$ , что свидетельствует о справедливости предлагаемой математической модели каплеобразования на гранулах наружной поверхности ПВР.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментов, проведенных для оценки степени адекватности предложенных моделей каплеобразования. В задачи опытов также входило нахождение предельных значений параметров, определяющих границы устойчивого каплеобразования и условий получения одноразмерных капель.

В экспериментах в поле силы тяжести использовалось капельное устройство, которое обеспечивало устойчивое каплеобразование в широком диапазоне расходов жидкости  $Q$ . Капли дистиллированной воды и глицерина при  $t=20^\circ\text{C}$  формировались на металлических цилиндрических насадках ( $\bar{R} = 0.916; 1.282; 2.197$ ), металлических конусах ( $\beta = 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$ ) и стеклянных сферах ( $\bar{R} = 0.989; 1.465; 2.619$ ) при обеспечении полного смачивания каплеобразующих элементов. Процесс отрыва регистрировался на фото пленку, а размеры отделившихся капель определялись после их улова в иммерсионную среду. Результаты экспериментов показали, что:

а) при квазистатическом подводе жидкости к поверхности каплеобразующих элементов размеры уловленных "основных" капель близки к рассчитанным по формулам (4)-(6). Полученные данные свидетельствуют о справедливости предложенной в гл.2 гипотезы о механизме отрыва капель;

б) статическая модель каплеобразования применима при расходах  $\ln \bar{Q} \leq -4$  (здесь  $\bar{Q} = Q/a$ , где  $a = (\sigma^5 / \rho^5 g^3)$ ), которым соответствует число Вебера  $0 \leq We \leq 0.001$ . В этом интервале условия формирования капель в поле силы тяжести близки к квазистатическим. Отмечается, что значение  $We=0.001$  должно быть предельным для использования статической модели в случае вращающихся каплеобразующих элементов, а также при рассмотрении каплеобразования на зернах ПВР. При  $We \leq 0.001$  размеры капель в распыле можно определять по формулам (9) и (10) для соответствующей формы зерен материала распылителя;



в) с увеличением скорости подпитки ( $\ln \bar{Q} > -4$ ) отмечается нелинейный рост объемов отрывающихся капель. При этом было установлено, что в интервале  $0.001 \leq We \leq 1.4$  на каплеобразующих элементах наблюдается стабильный процесс каплеобразования с получением монодисперсных капель. При значениях  $We > 1.4$  каплеобразование на элементах сменяется струеобразованием и состав капель становится полидисперсным. Отмечается, что для определения отрывных объемов капель в интервале  $0.001 \leq We \leq 1.4$  необходимо использовать динамическую модель каплеобразования, а число  $We = 1.4$  как и соотношение (12) можно считать критическим параметром работы ПВР, при котором достигается режим монодиспергирования.

В заключении главы приводятся результаты экспериментов по определению дисперсных характеристик ПВР из абразивного материала (с размером основной фракции зерен 250 и 400 мкм), работающих в III капельном режиме распыления. Анализ фракционного состава распылов показал, что средние (по Заутеру) диаметры капель близки к значениям, полученным с использованием рассмотренных моделей каплеобразования. Отклонение опытных данных от рассчитанных по формулам (9) и (10) менее  $\pm 9\%$ . Расхождение с результатами расчета по программе DropCalc составляет  $+18\%$ .

Пятая глава посвящена вопросам практического использования результатов исследований.

В основу предлагаемой методики инженерного расчета ПВР для промышленных аппаратов распылительного типа были заложены разработанные модели каплеобразования. Это позволяет расчетным путем устанавливать структурные и режимные параметры ПВР, гарантирующие получение заданного качества распыла. На примере определения требуемых характеристик центробежного скруббера с ПВР из абразивного материала, проектируемого для очистки промышленных газовых выбросов, показана технология использования методики расчета и ее точность.

В отдельных параграфах главы приведено описание разработанного способа и конструкций распылителей, позволяющих нейтрализовать образование капель-спутников при работе в режиме монодисперсного распыления. В их основе лежит применение каплеобразователей в виде гибких упругих нитей, удерживающих на своей поверхности микрокапли при отрыве "основных" капель. Здесь же формулируются необходимые условия для осуществления способа, механизм процесса иллюстрируется фотографиями. В заключении главы рассмотрена конструкция ПВР для работы с жидкостями, загрязненными механическими примесями. Основным элементом конструкции является вкладыш с конической внутренней поверхностью, выполняющий роль своеобразной центрифуги и отводящий частицы загрязнителя от внутренней поверхности пористого цилиндра распылителя. Такая конструкция рекомендуется для промышленных аппаратов с частичной или полной рециркуляцией жидкости.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена статическая модель каплеобразования, в рамках которой получено основное уравнение равновесия для капли, формирующейся на вращающихся каплеобразующих элементах ПВР, а также уравнение баланса сил, действующих на каплю в центробежном поле. Получены параметры максимальных устойчивых капель при различной геометрии каплеобразующих элементов.

2. На основе анализа сил и давлений в устойчивых каплях максимального объема выдвинута гипотеза о механизме отрыва капель. Она состоит в том, что разделение жидкости при нарушении равновесия капли происходит по плоскости нулевого Лапласовского давления, где равны силы поверхностного натяжения и тяжести. Определены координаты плоскости нулевого давления и рассчитаны объемы капель, отрывающихся от каплеобразующих элементов ПВР конической, сферической и цилиндрической форм поверхности при различных скоростях вращения.

3. Экспериментально установлено, что статическая модель каплеобразования применима при значениях критерия Вебера  $0 \leq We \leq 0,001$ . В этом интервале значений  $We$  условия формирования капель при работе ПВР близки к квазистатистическим.

4. Построена математическая модель динамики каплеобразования на зернах ПВР, учитывающая структурные характеристики пористого материала, а также интенсивность течения жидкости через распыливающую поверхность. Разработан алгоритм численной реализации модели.

5. Составлена программа для расчета изменения формы капель во времени с визуализацией этого процесса на экране ЭВМ. Рассчитаны отрывные объемы капель при различных структурных, геометрических и режимных параметрах работы ПВР.

6. Установлено, что динамика каплеобразования определяется соотношением двух основных критериев  $E_1$  и  $We$ , характеризующих, соответственно, относительный вклад центробежной силы и силы поверхностного натяжения жидкости. Получены графики зависимости объемов капель от этих параметров.

7. На основе предложенных моделей каплеобразования разработана методика инженерного расчета, позволяющая определять основные конструктивные, и технологические параметры ПВР в зависимости от требуемого качества распыливания жидкости.

8. Предложен способ и ряд конструктивных вариантов ПВР, позволяющих нейтрализовать образование капель-спутников при работе в режиме монодисперсного распыления. В их основе лежит применение каплеобразователей в виде гибких упругих нитей, удерживающих на своей поверхности микрокапли при отрыве «основных» капель. Разработана конструкция ПВР с вкладышем-центрифугой для работы с загрязненными жидкостями. Устройства защищены патентами и авторскими свидетельствами.

9. Промышленная реализация ПВР в аппарате для очистки аспирационного воздуха обеспечила высокую эффективность процесса и показала достаточную точность разработанной методики расчета распылителя.

### Условные обозначения

$\theta, \beta$  - угол;  $s$  – дуговая абсцисса;  $z, r$  – цилиндрические координаты;  $B$  – радиус кривизны в вершине капли;  $k_1, k_2$  – главные кривизны поверхности в точке;  $H$  – средняя кривизна;  $\rho, \mu$  – плотность и динамическая вязкость жидкости;  $\sigma, p$  – коэффициент поверхностного натяжения и давление жидкости;  $Q, v$  – объемный расход и скорость течения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $\chi, por$  – коэффициент проницаемости и пористость материала ПВР;  $\nabla, \Delta$  – операторы Гамильтона и Лапласа;  $t$  – время, температура;  $b$  – капиллярная постоянная.

### И н д е к с ы

c – контактный (contact); o – отрывной; b – основание (base); t – общий (total); k – капля; ср – средний.

Основное содержание диссертации опубликовано  
в следующих работах

1. А.С. № 1745358 (СССР). Распылитель для загрязненных жидкостей. Р.Г.Сафиуллин, А.А.Колесник, А.Б.Сергеев, Н.А.Николаев. Оpubл. в Б.И. №25, 1992.
2. Патент № 2034266 (Россия). Способ определения поверхностного натяжения жидкостей. Р.Г.Сафиуллин, А.А.Колесник, В.Н.Посохин, Н.А. Николаев. Оpubл. в Б.И. №12, 1995.
3. Патент № 2042438 (Россия). Механический распылитель. Р.Г. Сафиуллин, А.А.Колесник, В.Н.Посохин, Н.А. Николаев. Оpubл. в Б.И. №24, 1995.
4. Сафиуллин Р.Г. К расчету профиля капли, отходящей от вертикального цилиндрического стержня. – В межвуз. сб.: Гидромеханика отопительно-вентиляционных устройств, КазИСИ, Казань, 1993. – с.24-30.
5. Сафиуллин Р.Г. Способ определения поверхностного натяжения жидкостей. – В межвуз. сб.: Гидромеханика отопительно-вентиляционных устройств, КазИСИ, Казань, 1993. – с.67-72.
6. Сафиуллин Р.Г., Посохин В.Н. Определение объемов капель, отрывающихся от смачиваемой сферы. – В межвуз. сб.: Исследование сетей, аппаратов и сооружений водоснабжения и канализации, КазИСИ, Казань, 1995. – с.24-30.
7. Сафиуллин Р.Г., Субханкулов Р.Р., Маков Р.Н. Влияние геометрии каплеобразующего элемента, свойств и расхода жидкости на размер отрываю-

22

- щихся капель. – В межвуз. сб.: Гидромеханика отопительно-вентиляционных устройств, КазИСИ, Казань, 1997. – с.86-90.
8. Посохин В.Н., Салимов Н.Б., Сафиуллин Р.Г. О формировании капель на гранулах пористых вращающихся распылителей. - В межвуз. сб.: Гидромеханика отопительно-вентиляционных устройств, КазИСИ, Казань, 1999. – с.34-40.
9. Сафиуллин Р.Г., Колесник А.А., Посохин В.Н., Николаев Н.А. Определение размеров капель, отделяющихся от смачиваемых поверхностей // Изв.вузов. Химия и химическая технол., 1998, т.41, вып.3. – с.72-77.
- 10.Посохин В.Н., Салимов Н.Б., Сафиуллин Р.Г.Распыливание жидкостей пористыми вращающимися распылителями // Изв.вузов. Строительство, 1999, №11. – с.130-133.

Соискатель



Р.Г.Сафиуллин

Заказ 185. Тираж 100 экз.  
Формат 60×84/16. Объем 1.0 п.л

---

Печатно – множительный отдел КГАСА  
Лицензия № 03/380 от 16.10.95 г.  
420043, Казань, ул.Зеленая,1